第45卷 第6期
2022年11月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 45 No. 6
Nov. 2022

近20 a呼和浩特市城市化对植被物候的影响

元志辉[1,2,3]， 银 山[1]， 萨楚拉[1,2]， 池勇峰[3]

（1. 内蒙古师范大学地理科学学院，内蒙古 呼和浩特 010022；2. 内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010022；3. 内蒙古乌兰察布市自然资源局，内蒙古 乌兰察布 012000）

摘 要：了解植被物候与城市化之间的关系对于认识人类活动对生态系统的影响至关重要。基于呼和浩特市近20 a MODIS的两种植被指数数据，利用动态阈值法提取了植被物候，结合城市化指标，研究了2001—2020年呼和浩特市植被物候对城市化的响应。研究表明：森林和灌木地返青期(Start of growing season，SOS)发生较早(平均值第132 d)，但其枯黄期(End of growing season，EOS)也较早(第265 d)。SOS较晚的是耕地(第168 d)，EOS较晚的是草地(第275 d)，表明研究区木本植物SOS和EOS均早于草本植物。人造地表植被物候年际变化较大，在SOS和EOS的物候变化率分别为每10 a提前4.1 d和推迟0.7 d。此外，以人造地表比率和城乡梯度信息(即从城市核心到周边农村地区的同心环)为城市化指标，探讨了呼和浩特市中心城区植被物候对城市化的响应。研究发现SOS随人造地表比率上升而提前，EOS则出现相反的趋势。从城乡梯度上看，在特定范围内，远离城市中心SOS波动上升，即距城市中心越远植被SOS越晚，而EOS逐渐下降，即距城市中心越远植被EOS越早。总之，不同的城市化指标显示了植被物候对城市化的非线性响应。

关 键 词：植被物候；城市化；呼和浩特市

文章编号：1000-6060(2022)06-1890-09(1890~1898)

植被物候是植被生长的重要指标之一，在陆地生态系统的水碳循环中起着关键作用[1]。植被返青期(Start of growing season, SOS)是植被生长过程中的重要阶段之一，指植被开始萌芽生长的时间，对植被后期生长将产生重要影响[2]。生长季结束是物候中另一个最具代表性的物候参数，是植被休眠的开始或植被衰老(或落叶)的结束[3]。这2个参数共同确定植被的年生长长度[4]。物候与气候因子之间的关系在大尺度区域已经有了许多的研究，已逐渐成为研究全球变化对陆地生态系统影响及反馈机制的重要参数和研究对象[5]，但人类活动尤其小区域城市化对物候的深入和定量的研究相对较少。此外，了解城市化对物候的影响不仅有助于进一步了解城市化对气候变暖的物候反应，而且对制定城市人口缓解花粉季过敏以及观赏花木培育布局等至关重要[6]。由于观测到的植被覆盖度年际变化具有季节性，通过将植被覆盖度变化曲线的不同拐点与地面上的植被物候期联系起来，有利于提取相应参数。而遥感方法在很大程度上是一种检索物候数据的有价值工具，许多研究探索了利用基于卫星的物候测量[7]。

不同城市生态系统中的植被物候具有时空异质性，这取决于不同的植被类型、热岛环境和气候区[8]。本文选择我国北方干旱区主要核心城市之一的内蒙古自治区首府呼和浩特市作为研究区，其位于内蒙古自治区中西部大青山南侧(图1)，总面积约为1.7×10^5 km^2。呼和浩特辖4个市辖区及5个旗县，常住人口从五普239×10^5人到七普344×10^5人，中心城区面积210 km^2。研究区北部为大青山山地，南部为土默川平原，地势由东北向西南逐渐倾斜，平均海拔在940~2280 m[9]。该区域属中温带半

收稿日期：2022-02-28； **修订日期**：2022-03-24

基金项目：国家自然科学基金资助项目(41861014)；内蒙古师范大学研究生科研创新基金项目(CXJJB21018)；内蒙古自治区研究生教育创新计划资助项目(B20210199Z)资助

作者简介：元志辉(1988-)，男，博士研究生，主要从事土地覆盖与生态修复等方面的研究. E-mail: zhyuan@mails.imnu.edu.cn

通讯作者：萨楚拉(1977-)，男，教授，主要从事冰冻圈遥感等方面的研究. E-mail: sachulan@126.com

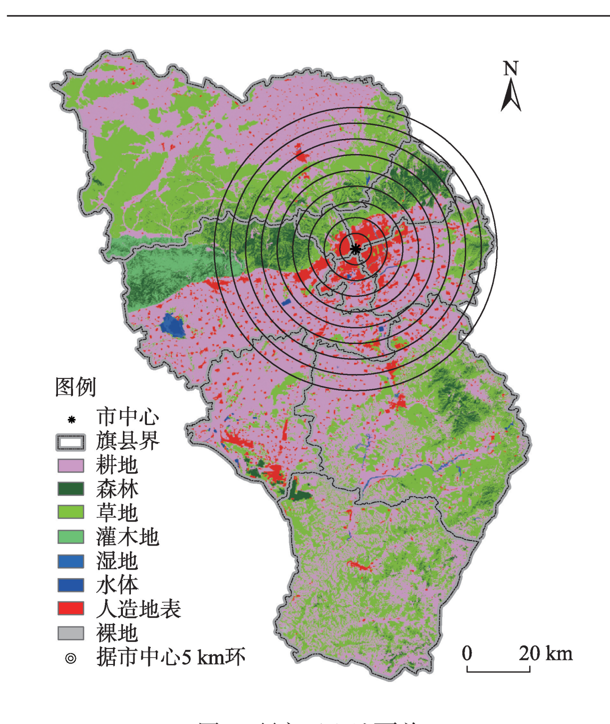


图1　研究区土地覆盖

Fig. 1　Land cover of the study area

干旱大陆性季风气候区，年平均气温2.0~6.7 ℃，年平均降水量为335.2~534.6 mm，无霜期为75~134 d，日照年均1600 h[10]。呼和浩特市从北到南，自然植被由森林植被逐渐过渡到山地草原植被、干草原植被、草甸草原植被、盐生植被和沙生植被[11]。市区分布的绿化植物主要有阔叶落叶乔木，以垂柳(*Salix babylonica*)、新疆杨(*Populus alba*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、山桃(*Prunus davidiana*)、小叶杨(*Populus simonii*)等为主；灌木有紫丁香(*Syringa oblata*)、榆叶梅(*Amygdalus triloba*)、玫瑰(*Rosa rugosa*)、华北珍珠梅(*Sorbaria kirilowii*)、连翘(*Forsythia suspensa*)等；针叶类树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、云杉(*Picea asperata*)、樟子松(*Pinus sylvestris*)等[12]。与我国大多数快速发展城市一样，其城市化在近20 a得到巨大发展[13]。因此，研究呼和浩特市的城市化对周边植被物候的影响，对于认识人类活动对生态系统的影响至关重要，并且有着重大意义。

1　资料与方法

1.1　资料

计算物候参数所使用的遥感数据来自NASA免费提供的覆盖呼和浩特市的MOD13Q1产品，本文使用该数据2001—2020年16 d分辨率250 m的归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)和增强型植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)数据。NDVI广泛用于推断植被物候学和增长[14]，因为它们表明林冠生物物理参数的变化如地上部生物量和叶面积指数[15]，而EVI克服了植被饱和的现象，对稀疏或稠密植被的生长和衰退进行了敏感的监测，并可以弥补NDVI的不足[16]。土地覆盖数据是我国研制的30 m空间分辨率覆盖全球南北纬80°的陆地范围地表覆盖数据(GlobeLand30)，包括耕地、森林、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪10种地表覆盖类型(http://www.resdc.cn/Datalist1.aspx?FieldTyepID=1,3)，本研究的时间序列为2001—2020年，使用了2000、2010年和2020年3期土地利用数据，为了与植被指数分辨率匹配，重采样为250 m分辨率。呼和浩特市的行政区界线基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图。

1.2　计算方法

1.2.1　物候计算方法　SOS为植被指数第一次跨越振幅50%的日期；枯黄期(End of growing season, EOS)为植被指数最后一次超过振幅50%的日期。本文使用两种植被指数以及两种方法(表1)求平均值作为最终物候提取方法，以提高物候提取的准确性[17]。

计算2001—2020年每个像元NDVI时间序列曲

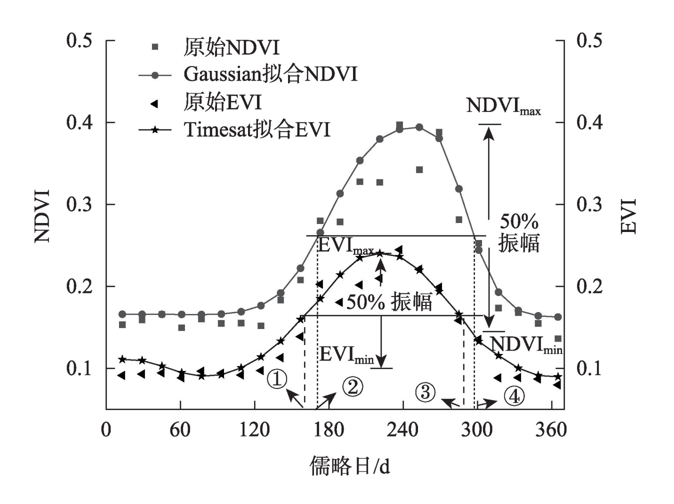
表1　两种计算物候方法

Tab. 1　Summary of two methods in determining phenology from MODIS data

数据	平滑方法	拟合函数	物候提取方法	阈值
NDVI	Gaussian	$\mathrm{NDVI}(t)=a+b\times \mathrm{e}^{-[(t-c)/d]^2}$	动态阈值法	50%振幅
EVI	Timesat	$\mathrm{EVI}(t)=(\sum_{i=-m}^{i=m} C_i \mathrm{EVI}_{j+i})/N$	动态阈值法	50%振幅

注：t为儒略日期；NDVI(t)为日期t处的拟合NDVI值；a、b、c、d为用最小二乘法对高斯曲线的拟合系数；e为自然对数的底数；EVI(t)为拟合的EVI值；C_i为滤波器第i个EVI的系数；EVI_{j+i}为EVI像元原始值；m为半个滤波窗口的宽度；N为平滑窗口大小的卷积整数；j为原始纵坐标数据表的运行索引。

线。然后将第一个振幅50%和下一个振幅50%作为2个动态阈值,在之前的研究中广泛用于遥感数据提取物候值[18]。即将一年内首次通过50%振幅对应的NDVI时间点定义为SOS,将第二次通过50%振幅对应的NDVI时间点定义为EOS。EVI数据使用相同的方法提取物候期,最终将两种指数提取物候平均值作为本文研究的物候参数(图2)。



注:NDVI为归一化植被指数;EVI为增强型植被指数;$NDVI_{max}$、$NDVI_{min}$分别为最大和最小NDVI;EVI_{max}、EVI_{min}分别为最大和最小EVI。①~④分别为EVI提取的SOS、NDVI提取的SOS、EVI提取的EOS、NDVI提取的EOS。

图2 物候提取方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of phenology extraction method

1.2.2 趋势分析法 采取线性回归分析法分析20 a呼和浩特市植被物候的整体变化趋势,单个像元多年回归方程中趋势线斜率即为年际变化率。斜率为正表示物候推迟,负表示植被物候提前[19]。

$$a=\frac{n\sum_{i=1}^{n}x_i i-\sum_{i=1}^{n}x_i\sum_{i=1}^{n}i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-(\sum_{i=1}^{n}i)^2} \quad (1)$$

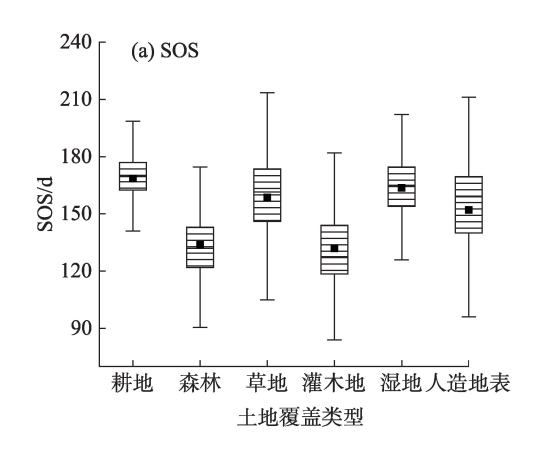
式中:a为趋势斜率,代表物候变化趋势及其大小;i为监测年份;n为研究时间段的年数;x_i为第i年某一像元的植被物候值。

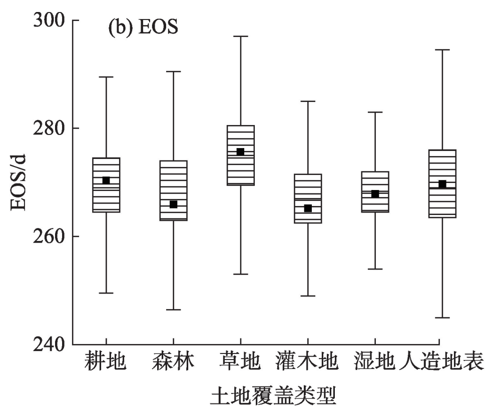
1.2.3 城市化指标设定 第一个城市化指标为人造地表比率,在呼和浩特全市域建立250 m的渔网,计算每个渔网中人造地表所占面积比,并以10%~100% 10个等级,赋值到每个渔网格网中,这种等级划分反应城市化水平。第二个城市化指标为城乡梯度,距市中心建立5 km间隔的缓冲区,本文以呼和浩特市新华广场为中心,建立完全覆盖中心城区5~45 km九等同心圆环(图1),45 km及以外区域代表城乡结合部或农村地区。使用该方法代表城乡梯度,借鉴了Zhang等[20]的代表城市化变化方法。

2 结果与分析

2.1 物候空间格局和总体趋势

从2020年不同土地覆盖的植被物候统计可以看出(图3),呼和浩特市地区森林和灌木地的SOS出现最早,两者主要出现在120~143 d,即4月底到5月下旬,平均值都在第132 d左右,而其他植被类型SOS平均值均在150 d以上,表明该地区木本植物比草本返青早。耕地返青出现最晚,平均值在第168 d左右。而EOS出现较晚的是草地,平均值在275 d左右,即国庆节前后。而森林和灌木地EOS出现较





注:SOS为返青期;EOS为枯黄期。下同。

图3 不同土地覆盖的EOS和SOS的差异

Fig. 3 Boxplot of phenological indicators across different land cover types

早，平均值都为第265 d左右，说明木本植物返青早枯黄也早。

从近20 a的变化趋势空间分布上看(图4)，植被SOS提前和推迟趋势的区域比较集中，提前趋势主要集中在呼和浩特市中心城区的人造地表覆盖范围内，而推迟趋势主要分布在研究区东北区域高海拔的草地和林地范围内。植被EOS提前趋势不明显，而推迟主要分布在中心城区和研究区的西北角。总体来说，2001—2020年中心城区的植被SOS提前，EOS推迟，则生长季长度延长，表明近20 a该区域的物候变化最不稳定，因而有必要研究中心城区的物候变化。

为了保证土地覆盖的一致性，排除土地利用变化对植物物候的影响，选择3期土地覆盖不变的区域，而湿地由于多年未变化面积较小，仅统计5类植被覆盖物候值。在整个呼和浩特市地区，人造地表[−4.1 d·(10a)$^{-1}$]和灌木地[−3.4 d·(10a)$^{-1}$]的植被SOS比其他土地覆盖类型更为敏感(图5a)。在过去的20 a里，除了草地表现出微弱推迟，其他覆盖类型SOS均表现为提前。而EOS趋势中森林的变化最大[−1.9 d·(10a)$^{-1}$]，但是除了人造地表[0.7 d·(10a)$^{-1}$]外，其他覆盖类型EOS均呈提前趋势(图5b)。横向比较来看，人造地表生长季长度以每10 a延长近5 d，而草地以0.5 d·(10a)$^{-1}$缩短，其他地表覆盖类型生长季变化不明显。这种现象很可能是由于城市热岛效应，提前人造地表植被SOS日期，并推迟了EOS。此外，值得注意的是，不同土地覆盖的多年EOS比SOS平均值更接近，这种时间上的趋势与图3一致。

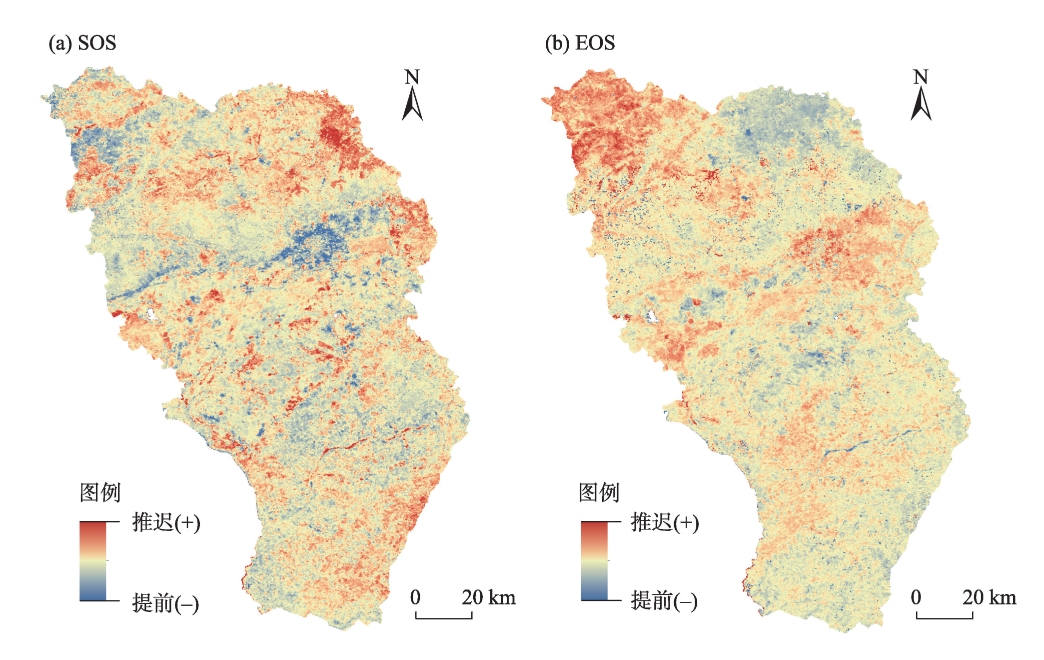


图4　近20 a呼和浩特市植被物候时空变化趋势

Fig. 4　Spatio-temporal variation trend of vegetation phenology in Hohhot City during 2001—2020

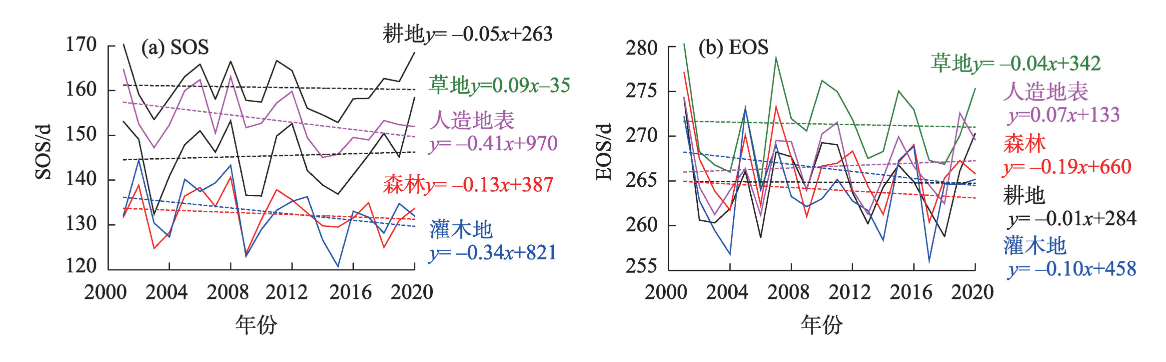


图5　不同土地覆盖SOS和EOS的年际变化

Fig. 5　Interannual change of SOS and EOS across different land cover types

2.2 植被物候对城市化的响应

从物候指标对不同人造地表比率的响应来看，随着人造地表比率增高，SOS逐渐下降，当人造地表比率达到100%时，SOS平均值陡然下降到最低值（图6a）。而随着人造地表比率增高，EOS表现出与SOS几乎相反的变化（图6b）。对于城市化水平相对较高的地区，物候指标主要反映出受热量影响的城市区域植被影响，表明温度是解释植被物候变化的关键驱动因素。对于城市化水平最高的地区（100%），物候指标剧烈变化，物候可能主要受城市热岛效应影响。人造地表比率较低的地区（如小于25%）为非城市主导的像素。这些地区的物候指标主要归因于其他土地覆盖类型影响。

从不同的城乡梯度看物候变化（图7），随着距市中心越来越远，2001—2020年SOS呈"倒U"型趋势，但总体推迟，而EOS整体呈提前，这在时间趋势上与图4空间上人造地表年际变化相似。物候极值在城乡梯度的中间，最大的SOS发生在距离城市中心约35 km的环内，比城市中心的地区或外围农村地区更晚。而最小的EOS也发生在距离城市中心约35 km左右，这个范围内整体上遵循城市热岛效应模式[20]。35 km之后EOS趋于稳定，比城市中心更早，但与外围农村地区接近，该区域物候指标更多是由于受植被类型影响。由此可知，从城市中心到城乡结合地区物候值不是恒定不变的，表明植被物候对城市化的响应存在差异。随着环距离增大，城市的不透水面比例越来越小，而农田和草地比例逐渐增长。说明除了热岛效应，这些环中土地覆盖比例的变化也是造成城乡梯度差异的主要原因。此外本研究还观察到不同年份的SOS变化比EOS变化更有规律，但其规律没有城乡梯度明显，表明全球气候的影响可能弱于城市化影响。

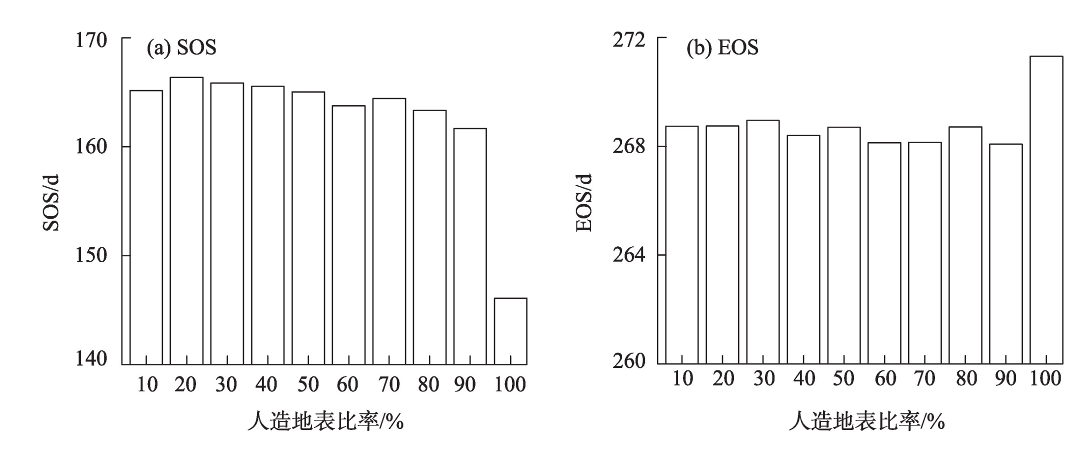


图6 不同人造地表比率的植被物候平均值

Fig. 6 Average vegetation phenology of different urban ratio

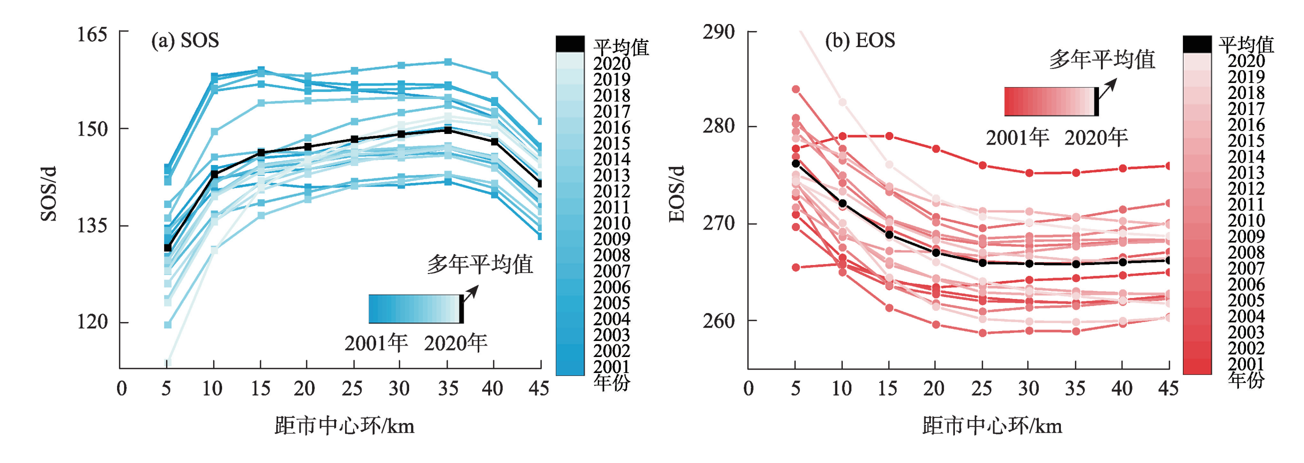


图7 植被物候对城市化的响应

Fig. 7 Response of vegetation phenology to urbanization

表2　其他文献地面观测结果

Tab. 2　Ground observation results from other literature

观测物种	观测地点	年份	物候期	平均值/d	文献
新疆杨(*Populus alba*)、青杨(*Populus cathayana*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)	呼和浩特市城区及周边地区	2010—2011	展叶盛期(4月末—5月初)	119	[9]
小叶杨(*Populus simonii*)	呼和浩特市南郊、土默特左旗和武川县	1994—2005	展叶盛期(4月下旬—5月上旬) 变色期(10月上旬—10月中旬)	129 279	[21]
车前(*Plantago asiatica*)	呼和浩特市南郊、土默特左旗和武川县	1994—2005	展叶盛期(4月上旬—4月中旬) 枯黄期(9月上旬—10月下旬)	110 279	[21]
垂柳(*Salix babylonica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、华北珍珠梅(*Sorbaria kirilowii*)、榆叶梅(*Amygdalus triloba*)	内蒙古大学校园、满都海公园和呼和浩特市树木园	1999—2014	始花期(4月上旬—5月中旬) 变色期(9月中旬—10月上旬)	-	[22]
山桃(*Prunus davidiana*)等20种主要观花树种	内蒙古农业大学东校区	2010	展叶盛期(4月下旬—5月上旬)	-	[23]
紫丁香(*Syringa oblata*)	内蒙古大学校园、满都海公园和呼和浩特市树木园	1979—2010	展叶盛期 落叶期	106 303	[24]
马兰(*Kalimeris indicus*)	呼和浩特市区、武川县	1982—2007	始花期(5月初—5月下旬) 落叶期(10月初—11月上旬)	131 290	[25]

注:平均值为儒略日。

3 讨 论

由于缺乏地面观测数据,故采用间接验证的方式对估算结果进行验证。将本文两种植被指数求平均计算的物候值与他人论文中观测的物候值进行对比验证,来检测估算的准确性与可行性(表2)。比较结果表明,2001—2020年呼和浩特市遥感物候值与在该市观测的物候值基本一致,但有微弱差异,出现这种情况主要原因在于:(1)单一物种和植被指数复合像元不同;(2)时间序列不一致;(3)地面观测物候阶段与遥感识别物候期不同。因此认定,两种方法的平均值适合于呼和浩特市植被物候的时空变化分析。

呼和浩特市周边的森林和灌木地SOS和EOS都比草本植物早,可能原因是木本植物具有较深的根系,一定程度上有利于它们从深层土壤中吸收水分[26],使得SOS对温度变暖反应迅速。而在秋季,有限的水分和低温会抑制植物的生长和光合作用[27],增加叶绿素降解和植物死亡的风险,进而提前叶片衰老的时间[28]。此外,高大的木本植物由于传输水分路径更长,植物顶端比接近地面温度低,最终导致木本植物EOS也比草本植物发生早。而耕地SOS较晚,可能原因是农作物由人为影响较大,且呼和浩特市周边农作物多以玉米和马铃薯为主,这两类经济作物出苗期均比草地和林地晚。而人造地表物候EOS较草本植物早,可能是遥感数据获取的植被指数机理等原因造成。所以,在未来的工作中,应更多使用地面观测数据或者更高分辨率的遥感数据对局部小区域的物候测定。

近20 a SOS研究区植被整体上以提前为主,但不同地表覆盖分异明显,而EOS不同地表覆盖的植被多年变化微弱。说明全球气候变暖和城市化持续推进对呼和浩特市的SOS影响较大,特别是人造地表和灌木地。此外,我们发现随着人造地表比率的提高,SOS出现了提前,而EOS发生了推迟,这一发现与我们的常识相同[22],热岛效应离中心越近,温度越高,导致上述情况发生。至于在100%比例时,SOS/EOS出现陡降/陡升,除了城市热岛效应影响显著外,还可能在纯粹的人造地表覆盖下,考虑到植被物候数据集的空间分辨率为250 m,不同物种的信号被反映为混合物候特征[29]。

植被物候沿城乡梯度的非线性关系,越靠近城市中心,SOS呈现出波动提前,而EOS先慢后快的趋势推迟,表明城市热岛效应带来地表温度升高,但距城市中心一定距离,城市热岛效应减弱,土地覆盖变化影响作用明显,导致两种物候参数相应变化。这种非线性响应,除了上述两种因素的影响外,其他非生物和生物因素,如城市的夜间光照和不同观光植物物种也可能影响植被物候对城市化的响应[30]。此外,城市市政树木灌溉和自然降水可

能会改变植被物候,这种影响在干旱地区的城市更明显[6]。总体而言,由于温度、降水、光周期等多种因素的影响,城市化对EOS的影响可能更为复杂,需要更多的物候地面观测实验来探讨观测到的物候变化趋势背后的机制。

总之,从以上分析中得出的物候结果仍然存在不确定性,有2个因素可能导致了这些不确定性。首先,除上述讨论中提到热岛效应外,与城市化相关的其他因素,如物种组成、水文状况、光周期、人工灌溉和大气CO_2浓度等,都可能影响物候活动[31]。其次,我们没有从研究中排除耕地。耕地的物候学很大程度上依赖于作物类型和人类管理,这些也对物候的识别产生影响[32]。总的来说,本研究一定程度表明了城市环境对研究未来全球变化的物候反应的价值。然而,城市化的影响是复杂的,需要更直接的观察、实验操作和跨界交叉比较研究。

4 结 论

本文从2个角度研究了呼和浩特市的不同土地覆盖类型和不同城市化的植被物候变化。首先,分析了2001—2020年多种土地覆盖类型的物候差异。然后,分别利用不同人造地表比率和从城市核心到农村地区的城乡梯度,研究了植被物候对城市化的响应。总的来说,我们发现植被物候对城市化的反应有所不同,并得出以下结论:

(1) 植被物候对不同地表覆盖的响应有所不同。SOS发生较早的是森林和灌木地(132 d),但其EOS也较早(265 d)。SOS较晚的是耕地(168 d),EOS较晚的是草地(275 d)。

(2) 物候指标在人造地表的变化率最为显著,其SOS每10 a提前4.1 d,而EOS每10 a推迟0.7 d。同时生长季长度每10 a延长近5 d。

(3) 不同的人造地表比率的植被物候存在差异。SOS随人造地表比率上升而提前,EOS则出现相反的趋势。

(4) 从城乡梯度上看,由城市中心到周边农村,SOS波动上升,而EOS逐渐下降,极值均发生在距市中心35 km左右。

参考文献(References)

[1] Liu Q, Fu Y H, Zeng Z, et al. Temperature, precipitation, and insolation effects on autumn vegetation phenology in temperate China[J]. Global Change Biology, 2016, 22(2): 644-655.

[2] 张雯, 包刚, 包玉海. 1982—2013年内蒙古植被返青期动态监测及其对气候变化的响应[J]. 中国农业信息, 2018, 30(2): 63-75. [Zhang Wen, Bao Gang, Bao Yuhai. Vegetation SOS dynamic monitoring in Inner Mongolia from 1982 to 2013 and its responses to climatic changes[J]. China Agricultural Information, 2018, 30(2): 63-75.]

[3] 吕达, 包刚, 佟斯琴, 等. 锡林郭勒盟植被物候枯黄期对干湿变化的时间多尺度响应[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 323-335. [Lü Da, Bao Gang, Tong Siqin, et al. Response of phenological vegetation wilting period to multi-scale drying-wetting changes in Xilingol[J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 323-335.]

[4] 元志辉, 萨楚拉, 银山. 基于Modis植被指数的浑善达克沙地植被物候变化[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5254-5263. [Yuan Zhihui, Sa Chula, Yin Shan. Research on vegetation phenological changes in the Otindag Sandy Land based on Modis NDVI and EVI[J]. China Environmental Science, 2021, 41(11): 5254-5263.]

[5] Hou X, Gao S, Niu Z, et al. Extracting grassland vegetation phenology in north China based on cumulative SPOT-VEGETATION NDVI data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3316-3330.

[6] Zhou D, Zhao S, Zhang L, et al. Remotely sensed assessment of urbanization effects on vegetation phenology in China's 32 major cities[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 272-281.

[7] Polgar C A, Primack R B. Leaf-out phenology of temperate woody plants: From trees to ecosystems[J]. New Phytologist, 2011, 191(4): 926-941.

[8] 韩见弘, 王佳, 李忠, 等. 呼和浩特市臭氧浓度变化特征及相关因子分析[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 73-78. [Han Jianhong, Wang Jia, Li Zhong, et al. Variation characteristics of ozone concentration and its influencing factors in Hohhot[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 73-78.]

[9] 徐鹏雁, 牛建明, Alexander B, 等. 呼和浩特市不同土地利用/覆盖类型对杨树春季物候的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(20): 5944-5952. [Xu Pengyan, Niu Jianming, Alexander B, et al. Variable effects of land use/cover patterns on plant spring phenology in Hohhot, Inner Mongolia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(20): 5944-5952.]

[10] 冯琰玮, 甄江红, 马晨阳. 呼和浩特市生境质量对城市用地扩展的时空响应[J]. 干旱区地理, 2020, 43(4): 1014-1022. [Feng Yanwei, Zhen Jianghong, Ma Chenyang. Spatiotemporal response of habitat quality to urban expansion in Hohhot City[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1014-1022.]

[11] 包红. 呼和浩特市公园绿地植物群落结构特征及其景观评价研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011. [Bao Hong. Study on the plant community structure characteristic of parkgreen space and landscape evaluation in Hohhot City[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011.]

[12] 贺晓辉, 郭鑫, 赵雨兴, 等. 呼和浩特市城市绿地植物调查及评价[J]. 内蒙古林业科技, 2016, 42(1): 59−62. [He Xiaohui, Guo Xin, Zhao Yuxing, et al. Investigation and evaluation on urban greenland plants in Hohhot[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 2016, 42(1): 59−62.]

[13] 李小璨, 阿荣, 佟宝全. 呼和浩特市生活性服务业空间布局特征及评价[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 1186−1197. [Li Xiaocan, A Rong, Tong Baoquan. Characteristics and evaluation of the spatial distribution of life service industry in Hohhot City[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 1186−1197.]

[14] Xu L, Myneni R B, Chapin F S I, et al. Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(6): 581−586.

[15] Shen M, Chen J, Zhu X, et al. Do flowers affect biomass estimate accuracy from NDVI and EVI?[J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8): 2139−2149.

[16] Huete A, Didan K, Miura T, et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1−2): 195−213.

[17] Fu Y H, Zhou X, Li X, et al. Decreasing control of precipitation on grassland spring phenology in temperate China[J]. Global Ecology and Biogeography, 2021, 30(2): 490−499.

[18] Jonsson P, Eklundh L. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2002, 40(8): 1824−1832.

[19] 元志辉, 包刚, 银山, 等. 2000—2014年浑善达克沙地植被覆盖变化研究[J]. 草业学报, 2016, 25(1): 33−46. [Yuan Zhihui, Bao Gang, Yin Shan, et al. Vegetation changes in Otindag sand country during 2000—2014[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 33−46.]

[20] Zhang Y, Yin P, Li X, et al. The divergent response of vegetation phenology to urbanization: A case study of Beijing City, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 803: 150079. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150079.

[21] 吕景华, 白俊明, 曹广义, 等. 呼和浩特地区自然物候特征分析[J]. 内蒙古农业科技, 2009(4): 45−47. [Lü Jinghua, Bai Junming, Cao Guangyi, et al. Analysis of natural phenology character in Hohhot[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2009(4): 45−47.]

[22] 朱媛君, 郝琦, 清华, 等. 呼和浩特自然历主要物候期和物候季节变化特征及归因[J]. 中国农业气象, 2017, 38(1): 9−20. [Zhu Yuanjun, Hao Qi, Qing Hua, et al. Changes of main phenophases of natural calendar and phenological seasons in Hohhot[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2017, 38(1): 9−20.]

[23] 谷爱珍, 张鸿翎. 呼和浩特市二十种主要观花树种春季物候特点[J]. 北方园艺, 2011(12): 78−80. [Gu Aizhen, Zhang Hongling. The phenological characteristics of twenty major tree species of flower in the spring in Hohhot[J]. Northern Horticulture, 2011(12): 78−80.]

[24] 王大川, 朴顺姬, 张颖, 等. 近30年呼和浩特市山桃、紫丁香叶和花的物候期对气候变化的响应[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 414−422. [Wang Dachuan, Piao Shunji, Zhang Ying, et al. Impact of climate change on leaf and flower datas of *Prunus persica* and *Syringa oblate* in recent 30 years in Hohhot[J]. Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition), 2012, 43(4): 414−422.]

[25] 吕景华, 白静, 苏利军, 等. 气候变暖对呼和浩特地区自然物候的影响[J]. 气象科技, 2012, 40(2): 299−303. [Lü Jinghua, Bai Jing, Su Lijun, et al. Impact of climate warming on phenophases in Hohhot[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(2): 299−303.]

[26] Wu X, Liu H, Li X, et al. Differentiating drought legacy effects on vegetation growth over the temperate northern hemisphere[J]. Global Change Biology, 2018, 24(1): 504−516.

[27] Tezara W, Mitchell V J, Driscoll S D, et al. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP[J]. Nature, 1999, 401(6756): 914−917.

[28] Dreesen F E, De Boeck H J, Janssens I A, et al. Do successive climate extremes weaken the resistance of plant communities? An experimental study using plant assemblages[J]. Biogeosciences, 2014, 11(1): 109−121.

[29] Amy B, Gregory S, Francisco E, et al. How do urban forests compare? Tree diversity in urban and periurban forests of the southeastern US[J]. Forests, 2016, 7(6): 120−120.

[30] Meng L, Mao J, Zhou Y, et al. Urban warming advances spring phenology but reduces the response of phenology to temperature in the conterminous United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117 (8): 4228−4233.

[31] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. The footprint of urban climates on vegetation phenology[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31: 179−206.

[32] Buyantuyev A, Wu J. Urbanization diversifies land surface phenology in arid environments: Interactions among vegetation, climatic variation, and land use pattern in the Phoenix metropolitan region, USA[J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105: 149−159.

Effects of urbanization on vegetation phenology in Hohhot City in the recent 20 years

YUAN Zhihui[1,2,3], YIN Shan[1], SA Chula[1,2], CHI Yongfeng[3]

(1. College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China;
2. Inner Mongolia Key Laboratory of Remote Sensing & Geography Information System, Hohhot 010022, Inner Mongolia, China;
3. The Department of Natural Resources of Ulanqab City, Ulanqab 012000, Inner Mongolia, China)

Abstract: It is essential to understand the impact of human activities on ecosystems by analysing the relationship between vegetation phenology and urbanization. In this study, the vegetation phenology of Hohhot City, Inner Mongolia, China was extracted using a dynamic threshold method based on two vegetation indexes from MODIS in recent 20 years, and the response of vegetation phenology to urbanization in Hohhot City from 2001 to 2020 was investigated using the urbanization index. We found that the start of growing season (SOS) of forests and shrubs occurred earlier (132 days), and the end of growing season (EOS) also occurred earlier (265 days). The later SOS was in crops (168 days), and the later EOS was in grasslands (275 days), indicating that both SOS and EOS of woody plants were earlier than those of herbaceous plants in the study area. The phenological change rate of urban vegetation was 4.1 days earlier and 0.7 days later per decade in SOS and EOS, respectively. In addition, we explored the response of vegetation phenology to urbanization in Hohhot City, using the urban ratio and information about urban-rural gradients (concentric rings from the urban core to surrounding rural areas) as the urbanization indicators. We found that SOS was advanced with an increase in urban ratio, whereas EOS exhibited the opposite trend. From the perspective of the urban-rural gradient within a certain distance, SOS fluctuated, whereas EOS decreased at a distance from urban centres. That is, the farther away from the city center, the later SOS and the earlier EOS. In conclusion, different urbanization indicators reflect the nonlinear response of vegetation phenology to urbanization.

Key words: vegetation phenology; urbanization; Hohhot City